

# Pre-adjustment method and dynamic correction of piezoelectric actuators e.g. for fuel-injection valve drive in motor vehicles

Publication number: DE19905340

Publication date: 2000-08-10

Inventor: KROEMER NILS (DE)

Applicant: SIEMENS AG (DE)

Classification:

- international: *F02D41/20; F02M51/06; F02M59/46; H01L41/04; H02N2/06; F02M63/00; F02D41/20; F02M51/06; F02M59/00; H01L41/00; H02N2/02; F02M63/00; (IPC1-7): F02M51/00; H02N2/06*

- european: F02D41/20P; F02M51/06A; F02M59/46E2; H01L41/04B

Application number: DE19991005340 19990209

Priority number(s): DE19991005340 19990209

Also published as:

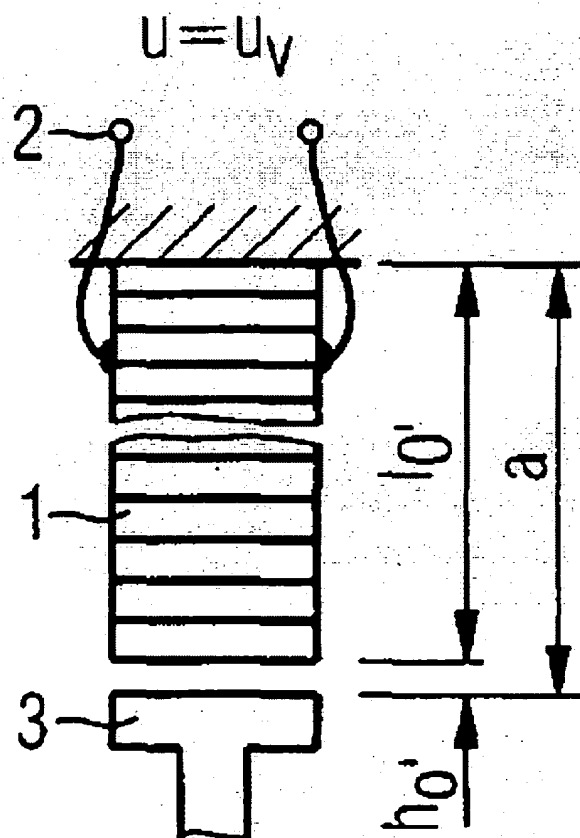


FR2789821 (A1)

[Report a data error here](#)

## Abstract of DE19905340

A method of adjusting and correcting or compensating electric piezo-actuators (1) from a stack of piezo-elements placed one on the other, in which an idling stroke ( $h_0$ ) exists between the piezo-actuator (1) driven by drive-voltage ( $U_1$ ), and an actuating element (valve stem 3) with the drive voltage ( $U_1$ ) not applied. A DC voltage ( $U_v, U_{vsol}$ ) is supplied for adjusting a given desired value ( $h_0', h_{sol}$ ) of the idling stroke during installation of the piezo-actuator (1) and/or for adjusting the idling stroke during operation of the piezo-actuator (1), to at least one part of the piezo-element of the piezo-actuator (1) for effecting a change in length of the piezo-actuator independent of the drive voltage ( $U_1$ ).



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**



71 Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

72 Erfinder:  
Kroemer, Nils, Dr., 09337 Hohenstein-Ernstthal, DE

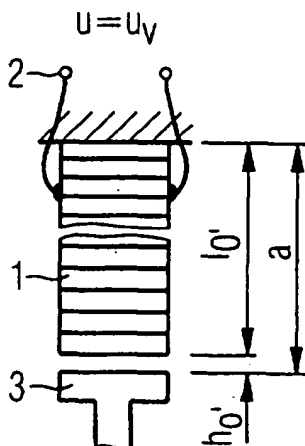
56 Entgegenhaltungen:  
DE 37 42 241 C2  
Katalog der Fa. PI Physik Instrumente Nr. PZ  
36-04/89.3, 1989, S. 5.2, 5.45;  
Firmenschrift Dr. Lutz Pickelmann Piezomechanik,  
Optik, 1982 "Analogverstärker, Rechnergesteuerte  
Versorgungen für Piezoaktoren", S. 3, 8;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren und Anordnung zur Voreinstellung und dynamischen Nachführung piezoelektrischer Aktoren

57 Bei dem Verfahren und der Anordnung zum Einstellen und Nachführen elektrischer Piezoaktoren (1) wird zum Einstellen eines gewünschten Leerhubs ( $h_0'$ ) zwischen dem Piezoaktor (1) und einem Betätigungselement (3) dem Piezoaktor (1) eine Gleichspannung ( $U_V$ ) zugeführt, die gegebenenfalls einer gepulsten Ansteuerspannung ( $U_1$ ) überlagert wird und die eine von der Ansteuerspannung ( $U_1$ ) unabhängige Längenänderung des Piezoaktors (1) bewirkt.



Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Anordnung zur Voreinstellung und dynamischen Nachführung piezoelektrischer Aktoren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. 7.

Für die Betätigung elektromechanischer bzw. elektrohydraulischer oder elektropneumatischer Stellelemente werden in zunehmendem Maße piezoelektrische Aktoren verwendet. Hierzu zählen insbesondere auch die Antriebe für Einspritzventile von Verbrennungsmotoren für Kraftfahrzeuge. Für die Kraftstoffversorgung von Verbrennungsmotoren werden nämlich zunehmend Hochdruck-Speichereinspritzsysteme verwendet. Solche Einspritzsysteme etwa für Dieselmotoren werden Common-Rail-Systeme genannt. Bei diesen Einspritzsystemen wird der Kraftstoff mit einer Hochdruckpumpe in einen allen Zylindern des Motors gemeinsamen Druckspeicher gefördert, von dem aus die Einspritzventile an den einzelnen Zylindern versorgt werden. Das Öffnen und Schließen der Einspritzventile, die bei Common-Rail-Systemen Injektoren genannt werden, wird elektrisch zum Beispiel mittels der genannten Piezoaktoren gesteuert. Der Piezoaktor wirkt dabei in der Regel auf ein Servoventil ein, das hydraulisch den Druck steuert, der auf die Düsennadel des Einspritzventils ausgeübt wird.

Die wesentlichen technischen Forderungen an derartige Piezo-Antriebe sind

- hohe Stellkraft,
- großer Stellbereich (Hub),
- hoher elektromechanischer Wirkungsgrad (geringe elektrische Steuerleistung),
- geringe Ansprechzeit,
- große Lebensdauer bzw. Anzahl Schaltspiele, und
- geringe Temperaturabhängigkeit.

Die Kombination von hoher Stellkraft mit großem Stellbereich läßt sich mit piezoelektrischen Vielschichtaktoren (Multilayer-Stacks) erreichen, die aus einem Stapel aufeinanderliegender plattenförmiger Piezoelemente bestehen. Derartige Aktoren sind bereits in unterschiedlichen Bauformen und Ausführungen bekannt. Neben Aktoren, bei denen die mechanische Auslenkung ausschließlich orthogonal zur Schichtebene erfolgt (Linearstacks), beispielsweise nach der DE 196 15 695 bzw. der DE 196 46 676, sind auch Ausführungen bekannt, welche eine Kippbewegung ausführen, z. B. sog. Torqueblocks nach der DE 196 46 511.

Grundsätzlich besteht bei den meisten Anwendungen das Ziel darin, daß näherungsweise der gesamte Hub des Piezoaktors auch für die mechanische Bewegung des Stellelementes genutzt wird, da die Baugröße mit dem erforderlichen Hub anwächst. Daraus folgt, daß das Spiel zwischen dem Piezoaktor und dem Stellelement, das auch als Leerhub bezeichnet wird, möglichst klein sein soll. Ein kleiner Leerhub dient außerdem der Reduzierung der dynamischen Belastung von Piezoaktor und Stellelement, da bei konstanter elektrischer Steuerspannung die Auslenkgeschwindigkeit des Aktors im Bereich kleiner Auslenkungen mit dem Hub wächst. Außerdem nimmt mit steigender Auslenkung die Stellkraft näherungsweise linear ab.

Andererseits muß stets ein Mindestspiel zwischen Aktor und Stellelement gewährleistet sein, um Fehlfunktionen im Betrieb zu vermeiden. Daher geht man heute in der Praxis im allgemeinen so vor, daß der Leerhub bei der Montage von Aktor und Stellelement so eingestellt wird, daß das geforderte Mindestspiel auch unter den ungünstigsten Bedingungen vorhanden ist und bekannte Alterungseffekte (Einklaufen, Setzen u. ä.) soweit wie möglich berücksichtigt sind.

Der Leerhub ist daher trotz eines hohen Meß- und Einstellaufwandes während der Montage des Systems in der Regel im Betrieb nicht funktionsoptimal. Er kann zudem bei abweichendem Systemverhalten im Betrieb unzulässig klein werden. Dies hat beispielsweise zur Folge, daß das Servoventil eines Common-Rail-Injektors nicht vollständig schließt und somit keine definierte Kraftstoffeinspritzung möglich ist.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Anordnung zu schaffen, bei dem bzw. bei der der Aufwand für das Einstellen des Leerhubes während der Montage insbesondere in der Serienfertigung reduziert ist, und bei dem bzw. bei der auf einfache Weise eine sichere dynamische Nachführung des Leerhubes im Betrieb möglich ist.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit den im Patentanspruch 1 bzw. den im Patentanspruch 7 angegebenen Maßnahmen gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung sind in den diesen Ansprüchen jeweils folgenden Unteransprüchen angeführt.

Die obige Aufgabe wird demnach erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß der elektrischen Ansteuerspannung des Aktors zur dynamischen Auslenkung ein davon unabhängiger steuerbarer Gleichspannungsanteil überlagert wird. Dieser Gleichspannungsanteil bestimmt dann eine neue Ruhelage des Aktors und kann somit zur Einstellung des Leerhubes und zur Nachführung des Leerhubes im Betrieb genutzt werden. Von Vorteil ist dabei, daß der Piezoaktor nahezu keine elektrische Leistung aus der Gleichspannungsquelle aufnimmt.

Die Größe des Leerhubes kann z. B. durch Messung des vom Aktor aufgenommenen Stromes sowie durch die Messung sekundärer Größen, welche sich aus der Systemfunktion ableiten lassen, bestimmt werden, z. B. durch den Druckverlauf am Injektor während des Einspritzvorganges. Somit ergibt sich ein geschlossener Regelkreis. Da eine Änderung des Leerhubes im allgemeinen sehr langsam gegenüber dem dynamischen Betrieb verläuft, ist diese Regelung nicht zeitkritisch.

Besonders vorteilhaft kann die Messung und Nachstellung des Leerhubes durch die Einbindung eines separaten Einstellalgorithmus in den Startvorgang eines Verbrennungsmotors erfolgen.

Der nutzbare Regelbereich beträgt in der Praxis ca.  $\pm 10\%$  des Gesamthubes. Bei Common-Rail-Injektoren wird beispielsweise ein Gesamthub des Aktors von ca. 40 bis 50  $\mu\text{m}$  angestrebt. Daraus folgt ein Regelbereich von ca.  $\pm 5 \mu\text{m}$ . Dieser Wertebereich ist für die Kompensation von Alterungs- und Temperatureffekten ausreichend.

In ähnlicher Weise wird eine separat aufschaltbare Gleichspannung genutzt, um während der Montage das Spiel zwischen Aktor und Stellelement exakt einzustellen. Hierbei wird vorteilhafterweise so verfahren, daß der Aktor bei der Montage mit einem Gleichspannungswert beaufschlagt wird, welcher zu einer statischen Auslenkung führt, die dem einzustellenden Spiel oder einem davon abgeleiteten Wert entspricht. Sobald während des Montagevorganges der mechanische Kontakt von Aktor und Stellelement erfolgt, wird der Einstellvorgang beendet, und die Komponenten werden zueinander lagefixiert. Nach dem Abschalten der Gleichspannung geht der Aktor in seine Ruhelage zurück, so daß sich das geforderte Spiel einstellt. Da der Zusammenhang zwischen elektrischer Spannung und Aktorauslenkung sehr exakt bekannt ist, läßt sich das Spiel mit hoher Präzision einstellen (Genauigkeit besser als 1  $\mu\text{m}$ ).

Auf diese Weise werden fehlerkritische geometrische Meß- und Paarungsoperationen bzw. mechanische Rückstellbewegungen weitgehend vermieden. Der mechanische

Kontakt von Aktor und Stellelement läßt sich sehr einfach erfassen, z. B. durch Wegmessung am Stellelement oder durch indirekte Größen, z. B. durch eine pneumatische Druckabfallprüfung.

Grundsätzlich kann die beschriebene Aufgabe auch dadurch gelöst werden, daß der Aktor aus zwei unabhängig voneinander ansteuerbaren, mechanisch in Serie geschalteten Stapeln von Piezoelementen besteht, wobei einer der beiden Stapel mit einer Gleichspannung zur Einstellung des Leerhubs beaufschlagt wird, während der andere Stapel zur Steuerung des Stell- oder Betätigungselementes genutzt wird.

Die Vorteile der beschriebenen Lösung sind

- einfache schaltungstechnische Realisierbarkeit,
- hohe technische Wirksamkeit,
- Diagnosefunktionen zum Zustand des Injektors im Betrieb ableitbar,
- Kosteneinsparung und Prozeßsicherheit in der Serienfertigung.

Ausführungsbeispiele der Erfindung werden im folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 einen Aufbau für eine Ventilsteuerung mit einem Piezoaktor, wobei in der Fig. 1a der Piezoaktor in Ruhelage und das Ventil geschlossen ist und in der Fig. 1b der Piezoaktor ausgelenkt und das Ventil geöffnet ist;

Fig. 2 schematisch den Leerhub in der Anordnung der Fig. 1, wobei in der Fig. 2a der Leerhub in der Ruhelage des Piezoaktors dargestellt ist und in der Fig. 2b ein durch Anlegen einer Gleichspannung nachgeführter Leerhub;

Fig. 3 den zeitlichen Verlauf der elektrischen Klemmenspannung  $U$ , des Hubes  $h$  und der zeitlichen Ableitung  $dh/dt$  des Hubes;

Fig. 4 die Übertragungsfunktion  $h(U)$ ;

Fig. 5 ein Blockschaltbild für die Überlagerung der dynamischen Anregungsspannung  $U_1$  und der statischen Vorspannung  $U_v$ ;

Fig. 6 den zeitlichen Verlauf der dynamischen Anregungsspannung  $U_1$ , des Druckes  $P_v$  und die zeitliche Ableitung  $dp_v/dt$  des Druckes;

Fig. 7 ein Zeitdiagramm für das Einstellen des Leerhubes beim Starten des Motors;

Fig. 8 die Vorgänge bei der Montage eines Piezoaktors, wobei die Fig. 8a den Zustand zu Beginn des Zusammenbaus, die Fig. 8b einen Zustand während des Zusammenbaus, die Fig. 8c den Zustand nach dem Zusammenbau und die Fig. 8d ein Zeitdiagramm für den Zusammenbau darstellt;

Fig. 9 einen Piezoaktor zur Erzeugung einer Kippbewegung, wobei die Fig. 9a den Ruhezustand und die Fig. 9b den ausgelenkten Zustand darstellt;

Fig. 10 schematisch Schaltungsanordnungen zur Einstellung des Leerkippwinkels  $\varphi_0$  bei der Anordnung der Fig. 9, wobei die

Fig. 10a und 10b Alternativen mit einer bzw. zwei Gleichspannungsquellen darstellen; und

Fig. 11 eine alternative Anordnung eines linearen Piezoaktors, der in zwei getrennt ansteuerbare Piezoelementstapel unterteilt ist.

Die Fig. 1 der Zeichnung zeigt schematisch und beispielhaft den Aufbau einer Ventilsteuerung mit einem elektrischen Piezoaktor 1, der aus einem Stapel plattenförmiger piezoelektrischer Elemente besteht. Bei der gezeigten Ausführungsform erfolgt die mechanische Auslenkung beim Anlegen einer Spannung senkrecht zur Schichtebene der einzelnen Piezoelementplatten, das heißt in Längsrichtung (z-Richtung) des Piezoaktors. Die einzelnen Piezoelemente

sind über gemeinsame äußere Stapelkontakte elektrisch mit Anschlußklemmen 2 verbunden.

Der Piezoaktor 1 hat in der Ruhelage, das heißt ohne daß eine elektrische Spannung  $U$  anliegt, die Länge  $l_0$  (Fig. 1a). Bei Anlegen einer elektrischen Spannung  $U = U_1$  an die Anschlußklemmen 2 des Piezoaktors 1 dehnt sich dieser in z-Richtung und nimmt die Länge  $l_1$  an mit  $l_1 > l_0$  (Fig. 1b). Die Differenz  $l_1 - l_0$  wird als Hub  $h$  bezeichnet. Der Abstand zwischen dem ungedehnten Piezoaktor 1 der Fig. 1a und dem mechanischen Stell- oder Betätigungselement (hier einem Ventilkolben 3) ist der Leerhub  $h_0$ . Der effektive Ventilhub  $h_v$  ergibt sich, wie in der Fig. 1b gezeigt, zu  $h_v = h - h_0 = l_1 - l_0 - h_0$ .

In dem in der Fig. 1a gezeigten Zustand befindet sich, da keine elektrische Spannung  $U$  angelegt ist, der Piezoaktor 1 in seiner Ruhelage, das Ventil ist geschlossen, und im Steuerraum 4 des Ventils herrscht ein Druck  $p_0$ . In dem in der Fig. 1b gezeigten Zustand ist an die Anschlußklemmen 2 die Spannung  $U_1$  angelegt, der Piezoaktor 1 ist ausgelenkt, der Ventilkolben 3 hat eine Ventilkugel 5 gegen die Wirkung einer Rückstellfeder 6 von ihrem Sitz abgehoben, das Ventil ist dadurch geöffnet, und im Steuerraum stellt sich ein Druck  $p_1$  ein.

Die Fig. 2a zeigt noch einmal im Detail den Leerhub  $h_0$  in der Ruhelage des Piezoaktors 1, wenn keine Spannung  $U$  anliegt. Es besteht nun die Möglichkeit, den Leerhub, das heißt den Abstand oder das Spiel zwischen Piezoaktor 1 und Ventilkolben 3, durch Anlegen einer Gleichspannung  $U_v$  an die Anschlußklemmen 2 des Piezoaktors 1 zu verringern. Die Gleichspannung  $U_v$  ist dabei kleiner als die Ansteuerungsspannung  $U_1$  der Fig. 1b. Bei der Gleichspannung  $U_v$  kommt der Piezoaktor 1 daher nicht mit dem Ventilkolben 3 in mechanischen Kontakt, sondern nähert sich diesem nur an. Der Piezoaktor 1 dehnt sich somit bei Anlegen der Gleichspannung  $U_v$  auf eine Länge  $l_0'$ , die kleiner ist als die Länge  $a$ , bei der der Piezoaktor 1 gerade mit dem Ventilkolben 3 in Kontakt kommt, ohne diesen zu bewegen. In der Fig. 2b ist entsprechend der Leerhub durch Anlegen der Gleichspannung  $U_v$  auf den Sollwert  $h_0'$  mit  $h_0' < h_0$  eingestellt.

Die Fig. 3 zeigt den zeitlichen Verlauf der elektrischen Spannung  $U$  an den Anschlußklemmen 2 des Piezoaktors 1, das heißt  $U(t)$ , sowie den Hub  $h(t)$  und dessen zeitliche Ableitung  $dh/dt$  (die Bewegungsgeschwindigkeit). Dargestellt ist auch der im allgemeinen gewünschte Zielbereich  $h_{0\text{opt}}$  des Leerhubes, in dem der Wert von  $dh/dt$  und somit die dynamische Belastung des Ventilkolbens 3 noch hinreichend gering ist. Der optimale Bereich für den Leerhub  $h_0$  liegt bei  $(0,01 \dots 0,1) \cdot h$ .

Die Fig. 4 stellt die Übertragungsfunktion  $h(U)$  schematisch dar. Durch Aufschalten der Vorspannung  $U_v$  im Wertebereich  $\Delta U_v$  wird die Kennlinie in Richtung der h-Achse um den Bereich  $\Delta h_0$  verschoben. Der zulässige Wertebereich für  $\Delta U_v$  liegt bei  $\pm 0,1 \cdot U_1$ . Bei konventioneller Piezokeramik beträgt die maximale elektrische Feldstärke  $U/d$  ca. 2 kV/mm ( $d$  = Dicke eines einzelnen Piezoelementes im Piezoaktorstapel). Die untere Grenze der elektrischen Spannung wird durch die Depolarisationsfeldstärke bestimmt.

Die Fig. 5 zeigt ein schematisches Blockschaltbild für eine Schaltungsanordnung zur Überlagerung der dynamischen (pulsförmigen) Anregungsspannung  $U_1$  und der statischen Vorspannung  $U_v$  für eine dynamische Nachführung des Leerhubes im Betrieb des Piezoaktors 1. Die Schaltung umfaßt einen Impulsgenerator 10 zum Erzeugen der Anregungsspannungsimpulse, die in einem Verstärker 11 auf die gepulste Anregungsspannung  $U_1$  verstärkt werden. Die Anregungsspannung  $U_1$  wird über eine Summationsschaltung 12 zum Piezoaktor 1 des Injektors 14 geführt. Vom Injektor

14 werden zum Beispiel Druckwerte  $x_{1...n}$  am Ventil 15 erfaßt und zu einem Mikroprozessor  $\mu C$  16 geführt, an dessen Eingängen auch andere Werte wie die Anregungsspannung  $U_1$ , der Anregungsstrom  $i$  und dergleichen anliegen. Der Mikroprozessor 16 berechnet dann die zur Einstellung des Leerhubs auf den Sollwert  $h_{0\text{ soll}}$  erforderliche Gleichspannung  $U_v$  und stellt eine regelbare Gleichspannungsquelle 18 so ein, daß diese die Gleichspannung  $U_v$  an die Summationsschaltung 12 abgibt, in der die Gleichspannung  $U_v$  der Anregungsspannung  $U_1$  überlagert wird.

Wie in der Fig. 6 gezeigt, kann der aktuelle Wert (Istwert) des Leerhubes im Mikroprozessor 16 beispielsweise aus dem Zeitversatz  $\Delta t_0$  zwischen den Flanken der pulsformigen elektrischen Anregungsspannung  $U_1(t)$  und der zeitlichen Änderung des Druckes  $p_v$  am Ventil 15 abgeleitet werden. Der Druckverlauf  $p_v(t)$  läßt sich mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand, z. B. mittels eines vorhandenen Drucksensors, messen.

Die Fig. 7 zeigt anhand eines Zeitdiagramms eine andere Möglichkeit der Einstellung des Leerhubs. Dieser Einstellvorgang kann zum Beispiel während des Startvorganges eines Verbrennungsmotors durchgeführt werden. Auch hier kann der etwa bei einem Common-Rail-System im allgemeinen ohnehin vorhandene Drucksensor vorteilhaft für die Messung des Druckverlaufes genutzt werden.

Der Einstellvorgang der Fig. 7 läuft wie folgt ab: Die Vorspannung  $U_v$  wird ausgehend von einem Minimalwert  $-U_{v\text{ max}}$  gleichmäßig erhöht, bis zum Zeitpunkt  $t_1$  bei einer Vorspannung  $U_{v0}$  das Ventil öffnet und der Druck  $p$  in der Kraftstoffleitung abfällt. Anschließend wird die Vorspannung  $U_v$  auf einen Wert  $U_{v\text{ soll}}$  verringert, der dem gewünschten Leerhub  $h_{0\text{ soll}}$  entspricht.

Zur Bestimmung von  $U_{v\text{ soll}}$  gilt:

$$U_{v\text{ soll}} = U_{v0} - h_{0\text{ soll}}/s, \text{ mit } s = \Delta h/\Delta U.$$

Je nach Auslegung des Gesamtsystems kann der Druck  $p$  automatisch unmittelbar nach dem Schließen des Ventils zum Zeitpunkt  $t_2$  (gestrichelte Linie) oder unabhängig vom Einstellvorgang zu einem späteren Zeitpunkt (durchgehende Linie) wieder aufgebaut werden.

Die Fig. 8 zeigt die Vorgänge bei einer Einstellung des Leerhubs während des Einbaus des Piezoaktors 1 in ein Einspritzventil. Der mit einer Gleichspannung  $U_{v\text{ soll}}$  beaufschlagte Aktor 1 wird bei der Montage mechanisch in z-Richtung auf den Ventilkolben 3 zu bewegt (Fig. 8a). Im Moment des mechanischen Kontaktes von Aktor 1 und Ventilkolben 3 sinkt der Prüfdruck  $p_v$  im Ventil ab (Fig. 8b,  $t_1$  in der Fig. 8d). Der mechanische Vorschub in z-Richtung wird dann sofort unterbrochen und der Aktor 1 in seiner Lage bezüglich des Ventilkolbens 3 fixiert. Beim Abschalten der Vorspannung  $U_{v\text{ soll}}$  zum Zeitpunkt  $t_2$  in der Fig. 8d geht der Aktor 1 dann in seine Ruhelage 10 zurück, und der Leerhub  $h_{0\text{ soll}}$  hat exakt den vorgesehenen Wert, der mittels der Spannung  $U_{v\text{ soll}}$  gewählt wurde.

Die Fig. 9 zeigt den aus der DE 196 46 511 bekannten Torqueblock. Hier wird anstelle der linearen Bewegung eine Kippbewegung erzeugt, wenn die an die beiden nebeneinanderliegenden Piezoelementstapel 20 und 22 jeweils angelegten Spannungen  $U_a$  und  $U_b$  verschieden voneinander sind. Dem Leerhub  $h_0$  entspricht hier der Leerkippwinkel  $\phi_0$ . Dieser Winkel  $\phi_0$  kann durch eine Differenz der Steuerspannungen  $U_a$  und  $U_b$  wie der Leerhub  $h_0$  voreingestellt bzw. im Betrieb nachgestellt werden.

Die Fig. 10 zeigt schematisch Schaltungsanordnungen zum Einstellen des Leerkippwinkels  $\phi_0$ . In diesen Anordnungen wurden zur Bezeichnung entsprechender Bauteile die gleichen Bezugszeichen wie in der Fig. 5 verwendet, die zur Unterscheidung der beiden Parallelzweige für die Piezoelementstapel 20 und 22 mit den Buchstaben A und B er-

gänzt wurden. Bei der Schaltung der Fig. 10a ist nur eine Summationsschaltung 12 in einem der beiden Parallelzweige A bzw. B und eine Gleichspannungsquelle 18 für eine Vorspannung  $U_v$  vorgesehen, die sowohl positive als auch negative Werte an die Summationsschaltung 12' abgeben kann. Bei der Schaltung der Fig. 10b ist in jedem der beiden Parallelzweige eine Summationsschaltung 12A, 12B vorgesehen und für jede der beiden Summationsschaltungen 12A, 12B eine eigene Gleichspannungsquelle 18A, 18B zur Abgabe der Vorspannungen  $U_{va}$  und  $U_{vb}$ . Von Vorteil ist bei dieser Ausführungsform, daß nur positive Spannungen erforderlich sind und somit die Feldstärke an den piezoelektrischen Elementen stets in Polarisationsrichtung wirkt.

Die Fig. 11 zeigt schließlich eine Lösung, bei der ein linearer Piezoaktor in zwei elektrisch getrennte und damit unabhängig voneinander ansteuerbare, mechanisch jedoch in Serie geschaltete Bereiche 30, 31 unterteilt ist. Jeder Bereich weist ein eigenes Paar von Anschlußklemmen 32, 33 auf. Der obere Bereich 30 hat lediglich die Aufgabe, den Leerhub einzustellen, wozu an die Anschlußklemmen 32 die Vorspannung  $U_v$  angelegt wird. Mit dem unteren Bereich 31, dem die Ansteuerspannung  $U_1$  zugeführt wird, erfolgt die dynamische Ansteuerung des Betätigungselements bzw. Ventils. Das Längenverhältnis  $l_2/l_1$  der Bereiche 30, 31 kann bei gleicher Dicke der piezoelektrischen Schichten in den beiden Bereichen etwa 1 : 10 betragen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Einstellen und Nachführen elektrischer Piezoaktoren (1) aus einem Stapel aufeinanderliegender Piezoelemente, wobei zwischen dem mit einer Ansteuerspannung ( $U_1$ ) ansteuerbaren Piezoaktor (1) und einem Betätigungselement (Ventilkolben 3) bei nicht anliegender Ansteuerspannung ( $U_1$ ) ein Leerhub ( $h_0$ ) vorhanden ist, **dadurch gekennzeichnet**, daß zur Einstellung eines vorgegebenen Leerhub-Sollwertes ( $h_{0'}$ ,  $h_{0\text{ soll}}$ ) während der Montage des Piezoaktors (1) und/oder zum Nachführen des Leerhubs während des Betriebs des Piezoaktors (1) wenigstens einem Teil der Piezoelemente des Piezoaktors (1) eine Gleichspannung ( $U_v$ ,  $U_{v\text{ soll}}$ ) zugeführt wird, die eine von der Ansteuerspannung ( $U_1$ ) unabhängige Längenänderung des Piezoaktors (1) bewirkt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einstellen des vorgegebenen Leerhub-Sollwertes ( $h_{0\text{ soll}}$ ) beim Zusammenbau des Piezoaktors (1) mit einem Betätigungselement (Ventilkolben 3) der mit der Gleichspannung ( $U_{v\text{ soll}}$ ) beaufschlagte Piezoaktor in Richtung auf das Betätigungselement bewegt wird, bis der Piezoaktor (1) und das Betätigungselement (Ventilkolben 3) mechanisch in Kontakt kommen, woraufhin der Piezoaktor (1) in seiner Lage zum Betätigungselement fixiert und die Gleichspannung ( $U_{v\text{ soll}}$ ) wieder abgeschaltet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zum Einstellen des vorgegebenen Leerhub-Sollwertes ( $h_{0\text{ soll}}$ ) bei einem fest eingebauten Piezoaktor (1) die Gleichspannung ( $U_v$ ) ausgehend von einem Minimalwert ( $-U_{v\text{ max}}$ ) erhöht wird, bis das Betätigungselement (Ventilkolben 3) betätigt wird, und anschließend die Gleichspannung ( $U_v$ ) um einen Wert verringert wird, der dem gewünschten Wert ( $h_{0\text{ soll}}$ ) für den Leerhub entspricht.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zum dynamischen Nachführen des Piezoaktors (1) im Betrieb der aktuelle Wert des Leerhubs ( $h_0$ ) aus dem Zeitversatz ( $\Delta t_0$ ) zwischen der pulsformigen An-

steuerspannung ( $U_1$ ) und dem zeitlichen Verlauf der vom Betätigungselement (Ventilkolben 3) ausgelösten Wirkung (Druckabfall in  $p_v$ ) ermittelt und dieser Zeitversatz durch Überlagern der Gleichspannung ( $U_v$ ) so eingestellt wird, daß sich der gewünschte Wert ( $h_0$  soll) für den Leerhub ergibt. 5

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Piezoaktor (1) zwei Bereiche (30, 31) umfaßt, die elektrisch getrennt ansteuerbar, mechanisch jedoch in Serie geschaltet sind, wobei an einem der Bereiche über die Gleichspannung ( $U_v$ ) der Leerhub eingestellt wird und der andere der Bereiche mit der Ansteuerspannung ( $U_1$ ) beaufschlagt wird. 10

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Piezoaktor (1) aus wenigstens zwei nebeneinanderliegenden Piezoelementstapeln (20, 22) besteht, an die jeweils verschiedene Steuerspannungen ( $U_a$ ,  $U_b$ ) angelegt werden, wobei der Leerhub ( $h_0$ ) einem Leerkippwinkel ( $\varphi_0$ ) entspricht, der durch die Differenz der Steuerspannungen ( $U_a$ ,  $U_b$ ) eingestellt und nachgeführt werden kann. 15 20

7. Anordnung zum Einstellen und Nachführen elektrischer Piezoaktoren (1) aus einem Stapel aufeinanderliegender Piezoelemente, wobei zwischen dem mit einer Ansteuerspannung ( $U_1$ ) ansteuerbaren Piezoaktor (1) und einem Betätigungselement (Ventilkolben 3) bei nicht anliegender Ansteuerspannung ( $U_1$ ) ein Leerhub ( $h_0$ ) vorhanden ist, und wobei die Anordnung einen Impulsgenerator (10) mit nachgeschaltetem Verstärker (11) zur Erzeugung der Ansteuerspannung ( $U_1$ ) umfaßt, dadurch gekennzeichnet, daß zur Einstellung eines vorgegebenen Leerhub-Sollwertes ( $h_0$ ,  $h_0$  soll) während der Montage des Piezoaktors (1) und/oder zum Nachführen des Leerhubes während des Betriebs des Piezoaktors (1) wenigstens einem Teil der Piezoelemente des Piezoaktors (1) eine Gleichspannung ( $U_v$ ,  $U_v$  soll) aus einer Gleichspannungsquelle (18) zugeführt wird, die gegebenenfalls der Ansteuerspannung ( $U_1$ ) in einer Summationsschaltung (12) überlagert wird und die eine von der Ansteuerspannung ( $U_1$ ) unabhängige Längenänderung des Piezoaktors (1) bewirkt. 25 30 35 40

8. Anordnung nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch einen Mikroprozessor (16), der die vom Betätigungselement (Ventilkolben 3) ausgelöste Wirkung erfaßt und der auf die Gleichspannungsquelle (18) derart einwirkt, daß die gewünschte Gleichspannung ( $U_v$ ,  $U_v$  soll) erhalten wird. 45

9. Anordnung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Piezoaktor (1) zwei Bereiche (30, 31) umfaßt, die elektrisch getrennt ansteuerbar, mechanisch jedoch in Serie geschaltet sind, wobei an einem der Bereiche über die Gleichspannung ( $U_v$ ) der Leerhub eingestellt wird und der andere der Bereiche mit der Ansteuerspannung ( $U_1$ ) beaufschlagt wird. 50

10. Anordnung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Piezoaktor (1) aus wenigstens zwei nebeneinanderliegenden Piezoelementstapeln (20, 22) besteht, an die jeweils verschiedene Steuerspannungen ( $U_a$ ,  $U_b$ ) angelegt werden können, wobei der Leerhub ( $h_0$ ) einem Leerkippwinkel ( $\varphi_0$ ) entspricht, der durch die Differenz der Steuerspannungen ( $U_a$ ,  $U_b$ ) eingestellt und nachgeführt werden kann. 55 60

- Leerseite -



FIG 1A

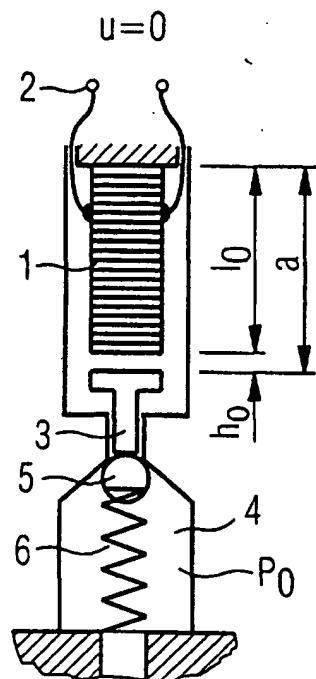


FIG 1B

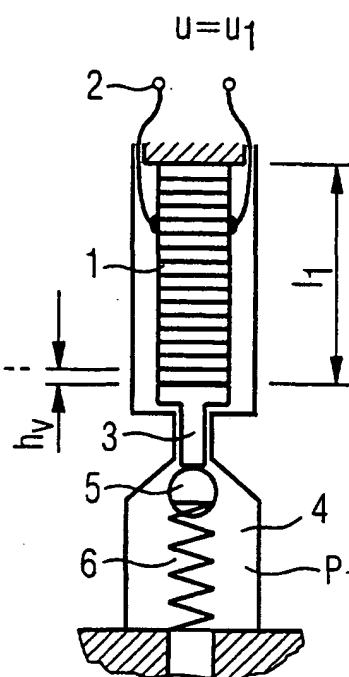


FIG 2A

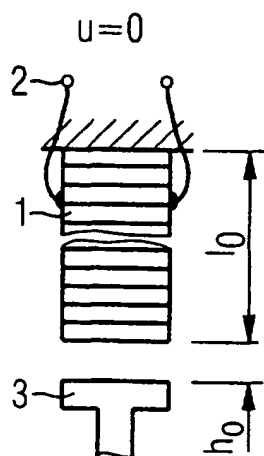


FIG 2B

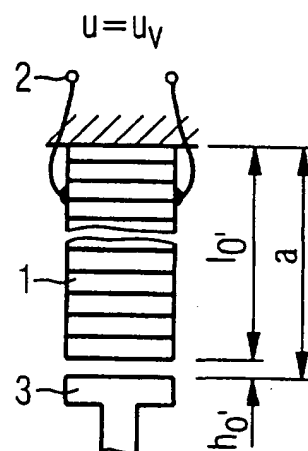


FIG 3

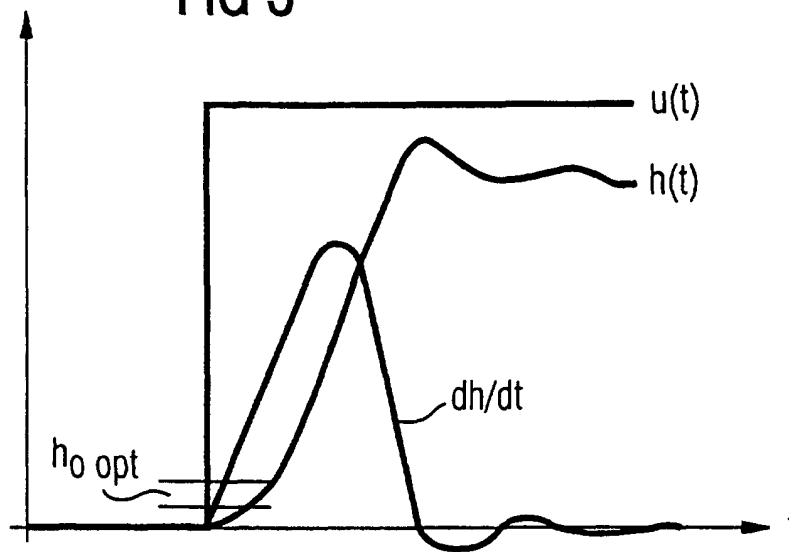


FIG 4

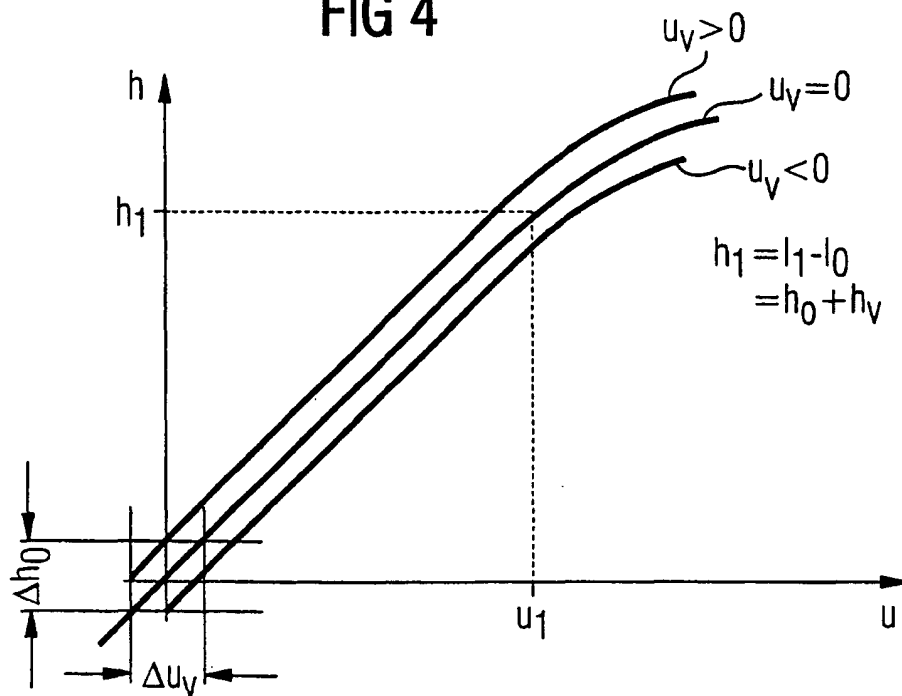


FIG 5

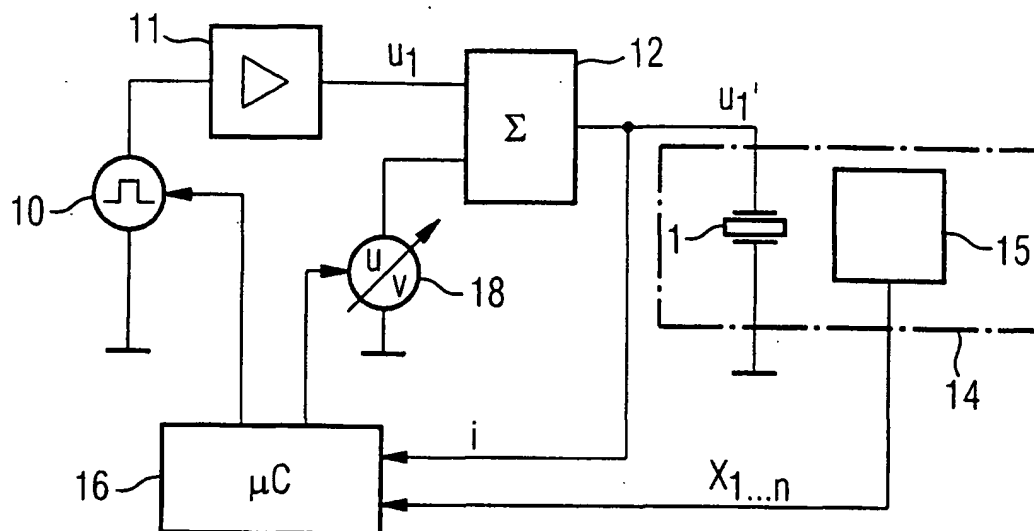
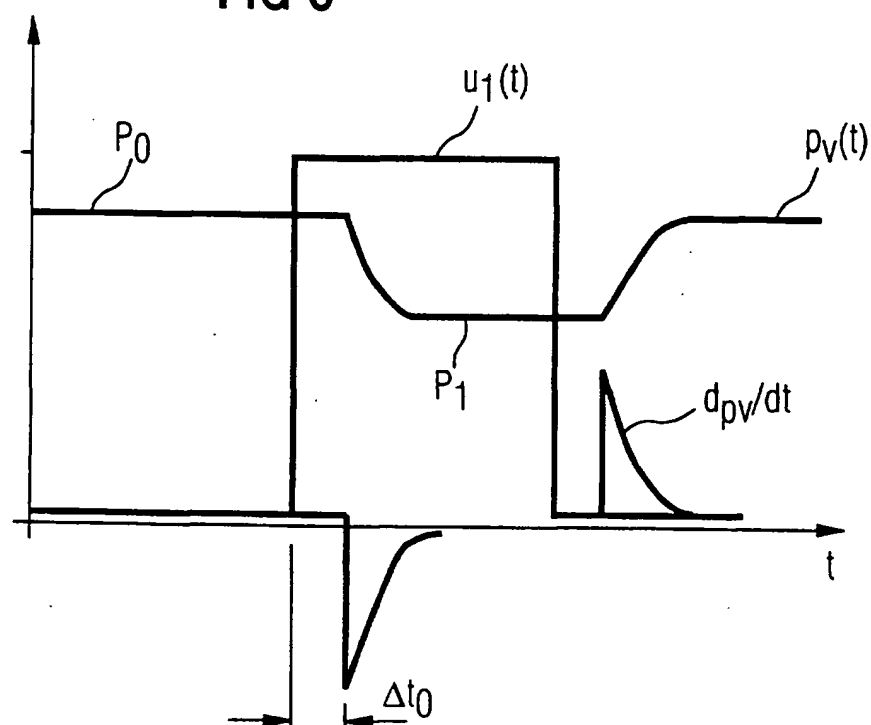


FIG 6



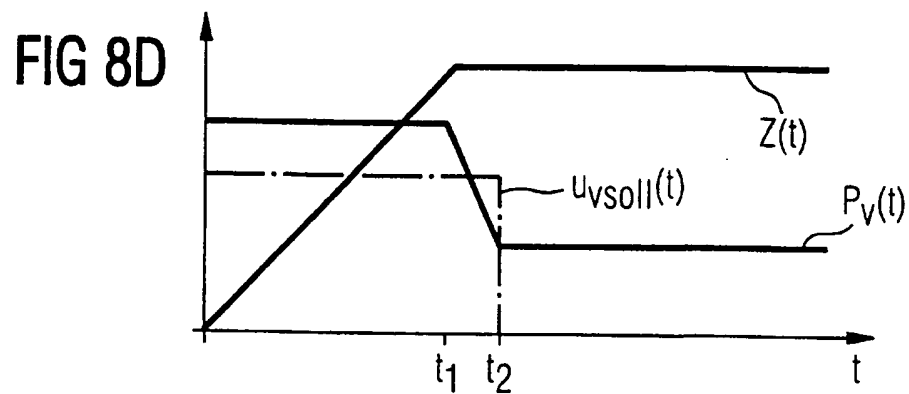
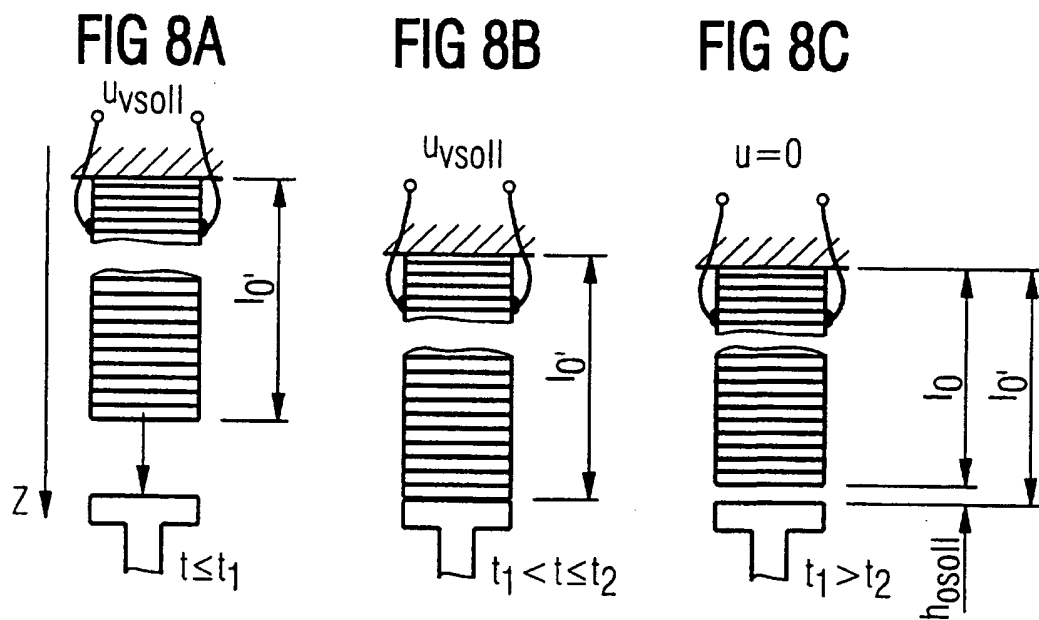
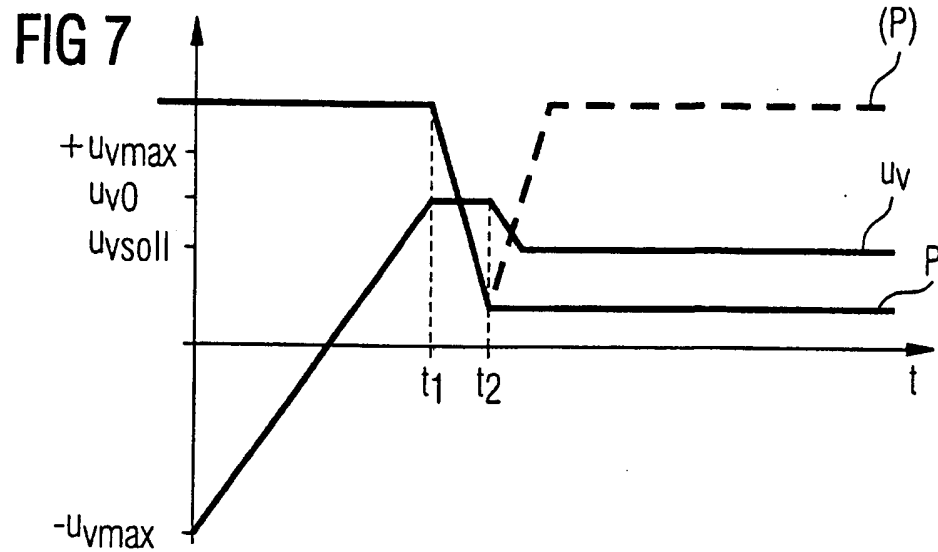


FIG 9A

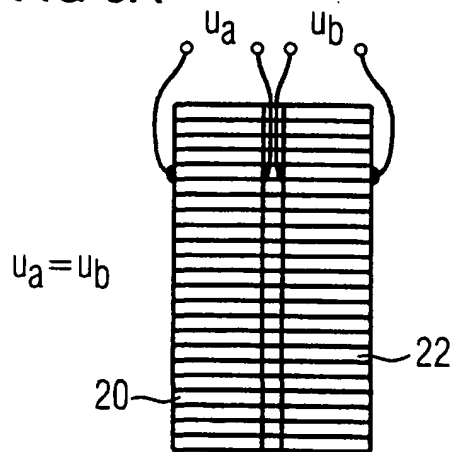


FIG 9B

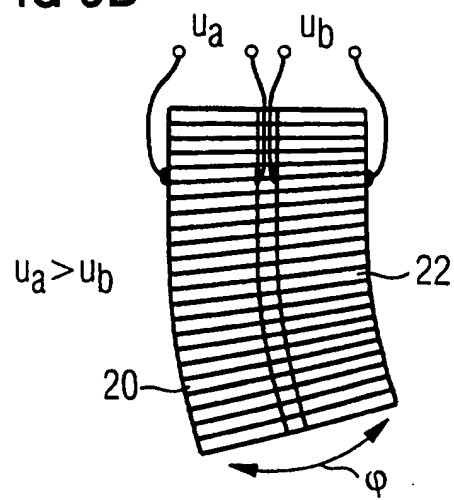


FIG 10A

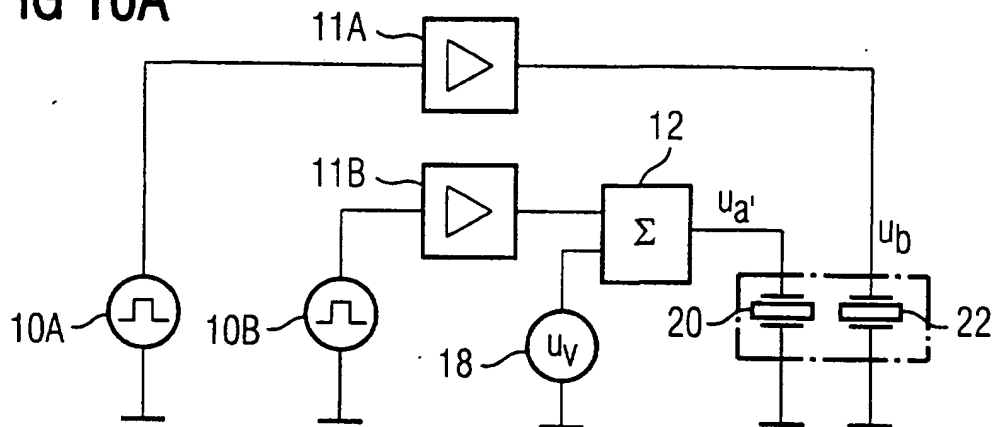


FIG 10B

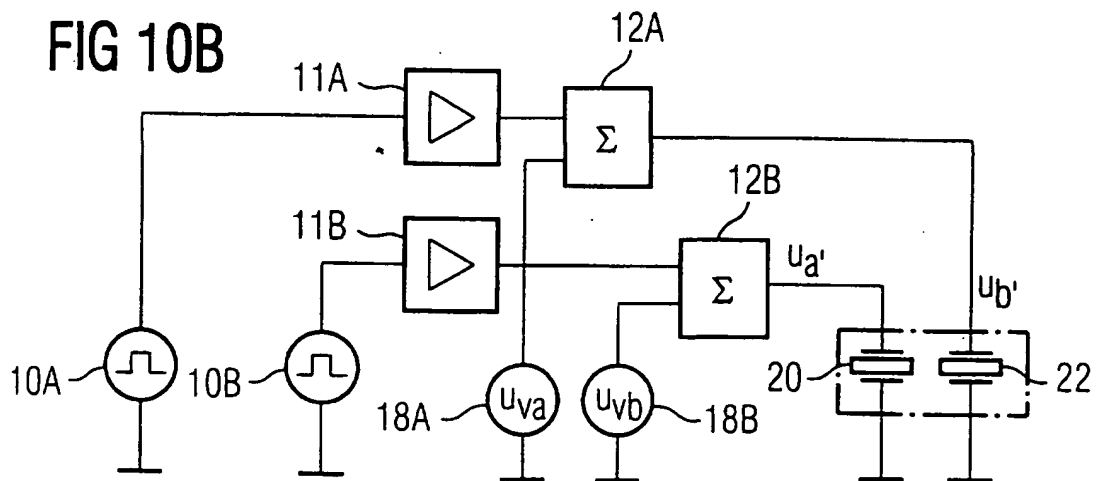
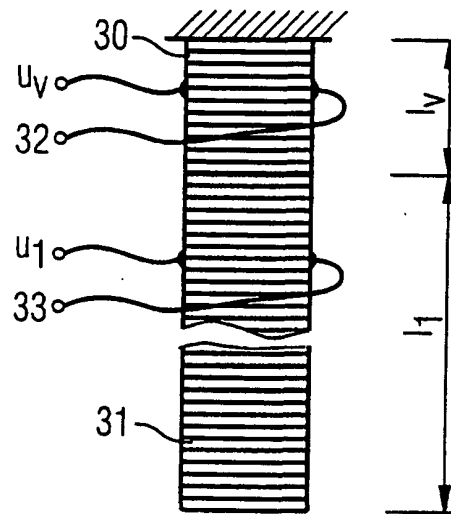


FIG 11



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**